不同施肥对雷竹林土壤肥力及肥料利用率的影响*

陈 闻[1, 2] 吴家森[1, 2] 姜培坤[1, 2†] 许开平[2] 黄程鹏[2]

(1 亚热带森林培育国家重点实验室培育基地，浙江农林大学， 浙江临安 311300；
（ 2 浙江农林大学环境与资源学院，浙江临安 311300)

摘 要 于2009年，在浙江省临安市的雷竹林中进行田间试验，以比较对照（不施肥）、常规施肥、缓释肥、竹笋专用肥和微生物肥对雷竹林土壤肥力质量、养分利用率和竹笋产量的影响。结果表明，雷竹林因施肥引起的土壤速效氮磷钾含量的过量积累和土壤酸化的程度按以下次序递减：常规施肥>专用复合肥≈缓释肥>微生物肥。常规施肥的肥料农学利用率最低，氮、磷和钾农学利用率分别为鲜笋4.7 kg kg^{-1}、23.6 kg kg^{-1}和14.2 kg kg^{-1}。与常规施肥处理相比，专用复合肥和缓释肥2个处理的氮、磷、钾农学利用率分别提高40.4%～53.2%、50.8%～90.7%和35.5%～39.5%，而微生物肥处理则分别提高38.9倍、67.8%和2.0倍。与对照相比，常规施肥处理的竹笋产量和经济效益分别提高了29.6%和14.3%，而专用复合肥、缓释肥、微生物肥3个处理的竹笋产量和经济效益分别提高了27.5%～29.0%和14.6%～17.8%。

关键词 施肥；雷竹；土壤肥力质量；养分利用率；产量；经济效益

中图分类号 S1533.4 文献标识码 A

雷竹(*Phyllostachys praecox*)是我国优良的栽培笋用竹种之一，具有易栽培、出笋早、产量高等特点，而且所生产的竹笋具有极高的经济价值和营养价值。目前，雷竹在中国长江以南各省均有栽培，其栽培面积已超过 2.62 ×10^6 hm^2[1]。

20 世纪 80 年代以来，以冬季地表增温覆盖和重施化肥为核心的雷竹早产高效栽培技术在雷竹林生产中得到了广泛应用[1]。在该项技术中，投入雷竹林地的化肥数量非常大，单施化肥的全年用量为 3.0~4.5 t hm^{-2}，化肥和有机肥配施的全年用量分别为 1.0~2.0 t hm^{-2} 和 80~100 t hm^{-2}[1]。虽然应用该项技术在短期内提高了竹农的经济效益，但也导致了土壤酸化，土壤养分过量积累，重金属浓度显著上升，部分竹林提前退化，土壤酶活性异常，竹笋硝酸盐含量严重超标，以及雷竹产区水体污染等一系列问题[1]。有监于此， 已有学者开展了测土施肥、降低化肥用量[2]、有机肥和无机肥配合施用[2]、研制雷竹专用复合肥[3]、平衡施肥等研究。本研究旨在探讨竹林在不同施肥处理下土壤养分的变化规律，并比较常规施肥、缓释肥、竹笋专用肥和微生物肥对雷竹林土壤肥力质量、养分利用率和竹笋产量的影响，为指导

*国家水体污染控制与治理科技重大专项（2008ZX07101-006）和浙江省水利厅科技计划项目（RC1019）资助
†通讯作者，姜培坤，男，教授，从事土壤与环境学研究，E-mail: jiangpeikun@zafu.edu.cn
作者简介：陈闻（1986-），男，硕士研究生，主要从事土壤与水土保持研究，E-mail:ssdchenwen@163.com
收稿日期：2010-11-29；收到修改稿日期：2011-05-03

科学施肥，促进雷竹持续早产高效提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区设在浙江省临安市浙江农林大学试验林场 (30º19′ N， 119 º35′ E)，属北亚热带季风气候。全年降雨量平均 1628mm，年平均气温为 15.8℃，七月平均温度为 28.1℃，1 月平均温度为 3.4℃，极端高温和极端低温分别为 41.9℃和-13.3℃，平均日照时数 1939 h，无霜期 234d。

试验区土壤类型为发育于砂页岩的红壤，土壤质地为砂质壤土。土壤 pH4.17，有机质 52.88 g kg^{-1}，水解氮 228 mg kg^{-1}，有效磷 338 mg kg^{-1}，速效钾 221 mg kg^{-1}，全氮 2.36 g kg^{-1}。

1.2 试验设计与处理

肥料试验于 2009 年 5 月在浙江省临安市的雷竹园上进行。该雷竹园已建园 15a，并进行过 6a 的冬季覆盖，试验地有大量覆盖物和凋落物未清除。实验设 5 个处理，3 次重复，随机区组设计，每个处理小区的面积为 100m^2。具体施肥方案参见表 1。

表 1 试验各处理的肥料用量及氮、磷、钾比例

Table 1 Fertilizer rates and ratio of N：P：K for the different treatments used in the experiment

处理编号 Treatment No.	处理 Treatment	肥料种类 Fertilizer kind	年施用量 Annual rate (kg $hm^{-2}a^{-1}$)	养分量 Nutrient rate (kg $hm^{-2}a^{-1}$) N	P	K	N：P：K
1	对照 CK	不施肥 No fertilizer	0	0	0	0	0：0：0
2	常规施肥 CF	复合肥 Compound fertilizer	2250	855	148	280	1：0.17：0.32
		尿素 Urea	1125				
3	缓释肥 CRF	缓释肥 CRF	2332	513	82	232	1：0.16：0.45
4	专用复合肥 SCF	专用复合肥 SCF	3206	513	84	213	1：0.16：0.42
5	微生物肥 MF	微生物肥 MF	6000	20	105	100	1：5.30：5.00

注 Note : CK，control；CF，conventional fertilization； CRF， controlled-release fertilizer； SCF， special compound fertilizer； MF， microbial fertilizer

1.3 肥料成分和施用时间

供试所用的肥料成分如下：复合肥的 N：P_2O5：K_2O 为 15：15：15，尿素含 N 量为 46%；缓释肥由江苏汉枫缓释肥料有限公司生产，其 N：P_2O_5：K_2O 比为 22：8：12；竹笋专用肥由江苏太仓汇丰化学肥料有限公司生产，N：P_2O_5：K_2O 比为 16：6：8；微生物肥由苏州世华田力宝生物肥料有限公司生产，其成分为煤矸石 69％～70%、磷矿粉 19％～20%、面粉 9％～10%、菌种 2％～4%(固氮菌、释钾菌、解磷菌)，含水分 2％～3%，N、P 和 K

含量分别为 3.3 g kg^{-1}、17.5 g kg^{-1} 和 16.7 g kg^{-1}。

施肥处理时间分别为：处理 2、处理 3 和处理 4 于 2009 年 5 月 25 日、9 月 6 日和 12 月 4 日分三次施入，每次施肥量分别占全年肥料用量的 40%、30%和 30%；处理 5 于 2009 年 5 月 25 日和 11 月 3 日分两次施入，每次施肥量各占全年用量的 50%。施肥后进行浅翻，深度 5cm 左右。

1.4 竹笋产量和经济效益的计算

2010 年春季，将不同时间萌发的竹笋分小区挖起，称其鲜重，记录各次产量，并计算总产量，乘以竹笋的平均价格（3.0 元 kg^{-1}），即得各处理的收入。肥料价格：复合肥，2.1 元 kg^{-1}；尿素，1.9 元 kg^{-1}；缓释肥，2.3 元 kg^{-1}；专用复合肥，1.8 元 kg^{-1}；微生物肥，1.0 元 kg^{-1}。各处理挖笋、施肥和喷农药的用工均为 70 天 hm^{-2}，每天 60 元。不同处理的收入减去总支出，即为经济效益。

1.5 土壤取样与测定方法

在每个小区内确立 1 m×1 m 的固定采样区，分别于 2009 年 7 月 18 日、9 月 18 日、11 月 18 日、2010 年 1 月 18 日和 3 月 18 日采集 0～30 cm 土样。采样时去除竹叶等枯落物和林地覆盖物。采集后的土壤样品经风干、研磨、过 2 mm 筛后备用。

土样分析方法参考文献[4]，土壤 pH (土∶水为 1∶5)采用玻璃电极法；土壤有机质采用重铬酸钾外加热法；全氮采用凯氏法；水解氮采用碱解法；有效磷采用 Bray Ⅰ法；速效钾采用乙酸铵浸提。

1.6 养分农学利用率的计算

养分农学利用率指的是所施单位养分所增加的作物经济产量，即施用肥料的每千克养分(如 N、P、K 等)提高作物经济产量的能力，因此它是表征养分利用效率最直观的方法。养分农学效率可按下式计算[5]:

养分农学效率 (kg kg^{-1})= [施肥区作物经济产量(kg hm^{-2})－无肥区作物经济产量(kg hm^{-2})] / 施肥量(kg hm^{-2})

在计算作物经济产量的方法上目前存在两种方法：一种为直接将施肥区作物的经济产量作为作物的经济产量 [6]，另一种为施肥区作物的经济产量减去无肥区作物的经济产量作为作物的经济产量 [5,7]。前一种方法所计算的养分农学利用率实际为土壤基础肥力和所施肥料共同贡献的作物经济产量，而后一种方法所计算的养分农学利用率才是所施肥料贡献的作物经济产量。因此，作者认为考察所施肥料的养分利用效率后者更科学，本研究采用后一种方法。

1.7 数据统计方法

试验数据采用 Excel 和 DPS 软件进行统计分析。

2 结果

2.1 不同施肥对雷竹林土壤肥力质量的影响

2.1.1 土壤 pH 从表 2 数据可以看出，不同处理的土壤 pH 无显著差异，其中以处理 2 的土壤 pH 最低，这与所施用的化肥量有关。比较试验结束时与试验前的土壤 pH 可以发现，各处理的土壤 pH 均有不同程度的降低，其中处理 2 降低最大，达 0.18 个 pH 单位。

表 2 不同施肥处理雷竹林土壤 pH 的变化

Table 2 The change in soil pH under *Phyllostachys praecox* stand with different fertilization treatments

处理编号 Treatment No.	土壤 pH Soil pH				
	2009 年 7 月 July,2009	2009 年 9 月 Sept., 2009	2009 年 11 月 Nov., 2009	2010 年 1 月 Jan., 2010	2010 年 3 月 March 2010
1	4.01a	4.07a	4.07a	4.11a	4.06a
2	3.94a	3.83a	3.84a	3.95a	3.99a
3	3.96a	4.06a	4.05a	4.08a	4.02a
4	3.98a	3.96a	3.90a	4.10a	4.03a
5	4.07a	4.09a	4.07a	4.03a	3.99a

注 Note: 同一列平均数后注有不同英文字母者为达到新复极差测验 5%显著水平 Means followed by a different letter within columns are significantly different according to Duncan's new multiple range test, $p \leq 0.05$

表 3 不同施肥处理雷竹林土壤有机质的变化

Table 3 The change in contents of organic matter in the soils under *Phyllostachys praecox* stand with different fertilization treatments

处理编号 Treatment No.	土壤有机质 Soil organic matter (g kg^{-1})				
	2009 年 7 月 July,2009	2009 年 9 月 Sept., 2009	2009 年 11 月 Nov., 2009	2010 年 1 月 Jan., 2010	2010 年 3 月 March 2010
1	52.40a	52.20a	52.14a	51.04b	50.95b
2	52.32a	52.07a	52.06a	50.46b	50.39b
3	52.37a	52.18a	52.04a	50.56b	50.08b
4	52.15a	51.87a	51.74a	50.20b	49.67b
5	53.35a	54.92a	54.49a	55.07a	55.14a

注 Note: 同一列平均数后注有不同英文字母者为达到新复极差测验 5%显著水平 Means followed by a different letter within columns are significantly different according to Duncan's new multiple range test, $p \leq 0.05$

2.1.2 土壤有机质含量　不同时期各处理的土壤有机质含量见表 3。从当年 7 月至翌年 3 月，处理 1 至处理 4 的有机质含量均呈现下降的趋势。翌年 3 月，处理 1 至处理 4 的土壤有机质含量分别较试验前下降了 3.6%、4.7%、5.3%和 6.1%，而施微生物肥的处理 5，土壤有机质含量的变化趋势则表现为随时间推移而增加。试验结束时处理 5 的有机质含量较试验前增加 4.2%。

2.1.3 土壤全氮和水解氮含量　不同处理的土壤全氮和水解氮含量如表 4 所示。与不施肥的对照(处理 1)相比，在第 1 次施肥后的 7 月，3 个施用化肥处理(处理 2、处理 3 和处理 4)的土壤全氮含量虽有较大增加，但并未达到 5%的显著水平，此后随着第 2 和第 3 次氮肥的施入，各次取样的土壤全氮含量均显著提高（$p < 0.05$）。在 3 个施用化肥处理中，高氮量（855 kg hm^{-2} a^{-1}）处理 2 的土壤全氮含量均高于低氮量（573 kg hm^{-2} a^{-1}）的处理 3 和处理 4，但其差异未达到 5%的显著水平。施微生物肥的处理 5 由于肥料中所含氮素极低，因此其土壤全氮含量与处理 1 持平。到试验结束，处理 1、处理 5 的土壤全氮含量分别比试验前降低了 13.6%和 12.3%，而处理 2、处理 3 和处理 4 则分别增加了 5.5%、2.1%和 3.0%。

表 4 不同施肥处理雷竹林土壤全氮和水解氮的变化

Table 4 The changes in contents of total N and hydrolytic N in the soils under *Phyllostachys praecox* stand with different fertilization treatments

处理编号 Treatment No.	2009 年 7 月 July,2009	2009 年 9 月 Sept., 2009	2009 年 11 月 Nov., 2009	2010 年 1 月 Jan., 2010	2010 年 3 月 March 2010
土壤全氮　Soil total N (g kg^{-1})					
1	2.28a	2.17b	2.13b	2.07b	2.04b
2	2.63a	2.56a	2.51a	2.58a	2.49a
3	2.52a	2.49ab	2.48ab	2.52a	2.41a
4	2.55a	2.49ab	2.46ab	2.51a	2.43a
5	2.31a	2.21b	2.16b	2.15b	2.07b
土壤水解氮 Soil hydrolysable N(mg kg^{-1})					
1	207b	166b	156b	147b	134 b
2	262a	229a	221a	224a	197a
3	222ab	198a	186a	228a	197a
4	229ab	201a	186a	207a	190a
5	214ab	195a	201a	215a	188a

注 Note: 同一列平均数后注有不同英文字母者为达到新复极差测验 5%显著水平 Means followed by a different letter within columns are significantly different according to Duncan's new multiple range test, $p \leq 0.05$

与处理 1 相比，在第 1 次施肥后的 7 月，4 个施肥的土壤水解氮含量虽有增加，但只有处理 2 的增加达到 5%的显著水平，此后随着第 2 和第 3 次氮肥的施入，各次取样的土壤水解氮含量反而比 7 月取样时略有降低，但其土壤水解氮含量仍显著高于处理 1（$p < 0.05$）。在 4 个施肥处理中，高施氮量的处理 2 的土壤水解氮含量高于其他 3 个处理，但其差异未达到 5%的显著水平。试验结束时处理 1 至处理 5 的土壤水解氮含量比试验前分别下降了 41.2%、13.6%、13.6%、16.7%和 17.5%。

2.1.4 土壤有效磷含量 不同时期各处理的有效磷含量列于表 5。4 个施肥处理的土壤有效磷含量在各次取样时均以高施磷量（P 148 kg hm^{-2} a^{-1}）的处理 2 最高，低施磷量（P 82～84 kg hm^{-2} a^{-1}）的处理 3 和处理 4 居中，施磷量为 P 100 kg hm^{-2} a^{-1} 的处理 5 最低。土壤有效磷含量处理 5 低于处理 3 和处理 4 的原因是由于所施用的磷肥为磷矿粉，其磷有效度较低。然而，4 个施肥处理的土壤有效磷含量均显著高于处理 1（$p < 0.05$）。试验结束时，处理 2 至处理 5 的土壤有效磷含量分别比处理 1 增加了 55.6%、41.7%、32.5%和 29.5%。

5 个处理的土壤有效磷含量均以 7 月取样时最高，此后总的变化趋势是随时间的推移而逐渐降低。

表 5 不同施肥处理雷竹林土壤有效磷的变化

Table 5 The change in contents of available P in the soils under *Phyllostachys praecox* stand with different fertilization treatments

处理编号 Treatment No.	土壤有效磷 Soil available P ($mgkg^{-1}$)				
	2009 年 7 月 July,2009	2009 年 9 月 Sept. 2009	2009 年 11 月 Nov. 2009	2010 年 1 月 Jan. 2010	2010 年 3 月 March 2010
1	317c	311c	306c	300c	295c
2	442a	434a	420a	446a	459a
3	419ab	401ab	385ab	414ab	418ab
4	433a	401ab	375ab	386b	391b
5	405ab	382ab	380ab	391b	382b

注 Note: 同一列平均数后注有不同英文字母者为达到新复极差测验 5%显著水平 Means followed by a different letter within columns are significantly different according to Duncan's new multiple range test, $p \leq 0.05$

2.1.5 土壤速效钾含量 不同时期各处理的土壤速效钾含量见表 6。施肥处理的土壤速效钾含量始终要高于对照，其中处理 2 的含量为最高，处理 4 高于处理 3，但 4 个施肥处理之间的差异并不显著（$p > 0.05$）。处理 1 的速效钾含量从当年的 7 月到翌年 3 月一直处于下降趋势。而处理 2 至处理 5，从当年 7 月至 9 月，速效钾含量下降，至 11 月份，速效钾含量有所增加，此后又呈降低趋势。

表 6 不同施肥处理雷竹林土壤速效钾的变化

Table 6 The change in contents of available K in the soils under *Phyllostachys praecox* stand with different fertilization treatments

处理编号 Treatment No.	土壤速效钾 Soil available K (mg kg^{-1})				
	2009 年 7 月 July,2009	2009 年 9 月 Sept. 2009	2009 年 11 月 Nov. 2009	2010 年 1 月 Jan. 2010	2010 年 3 月 March 2010
1	216.7b	190.8b	187.5b	178.3b	172.5b
2	264.3a	230.2a	248.8a	242.5a	218.3a
3	237.3ab	208.3ab	221.2ab	215.0ab	186.7a
4	251.7ab	221.8ab	236.8a	221.7ab	197.5a
5	226.7b	206.3ab	242.8a	216.7ab	206.7a

注 Note: 同一列平均数后注有不同英文字母者为达到新复极差测验 5%显著水平 Means followed by a different letter within columns are significantly different according to Duncan's new multiple range test, $p \leq 0.05$

2.2 不同施肥雷竹林竹笋产量及经济效益

从表 7 可知，5 种处理的雷竹笋产量高低依次为：常规施肥＞缓释肥＞微生物肥＞竹笋专用肥＞对照。试验第一年，对照处理的竹笋收入达到 40500 元 hm^{-2}。与处理 2 比较，处理 3 和处理 4 的氮、磷和钾肥用量分别减少了 40%、43.2%～44.6%和 17.1%～23.9%，但竹笋收入并未明显下降；处理 5 的氮、磷和钾肥用量分别减少了 97.7%、29.1%和 64.3%，竹笋收入也没有明显下降。从其经济效益来看，以对照处理最低，而以施缓释肥的处理 3 最高。比较 4 个施肥处理的产投比发现，缓释肥、竹笋专用肥和微生物肥处理的产投比均高于常规施肥处理，其中也以施用缓释肥的处理 3 最高。

表 7 不同施肥雷竹林的鲜笋产量和经济效益

Table 7 Fresh bamboo shoot yields and economic benefit analysis of *Phyllostachys praecox* stand with different fertilization treatments

处理编号 Treatmet No.	鲜笋产量 Fresh bamboo shoot yield (kg hm^{-2})	收入 Income (yuan hm^{-2})	支出 Payout (yuanhm^{-2})				经济效益 Economic benefit (yuan hm^{-2})	产投比 Ratio of output /input
			肥料 Fertilizer	用工 Labour	农药 Pesticie	合计 Total		
1	13500	40500	0	4200	450	4650	35850	8.71
2	17500	52500	6863	4200	450	11513	40988	4.56
3	17417	52251	5364	4200	450	10014	42237	5.22

4	17207	51621	5770	4200	450	10420	41201	4.95
5	17250	51750	6000	4200	450	10650	41100	4.86

2.3 不同施肥处理的雷竹肥料农学利用率的影响

一般而言，肥料利用效率随着施肥量的增加呈下降趋势。本研究的结果也符合这一规律(表8)，即不同施肥处理的N、P和K农学利用率按以下顺序递减：微生物肥 (处理5) >专用复合肥(处理4)≈缓释肥(处理3) > 常规施肥 (处理2)。

表 8 不同施肥处理的雷竹肥料农学利用率的影响

Table 8 Effects of different fertilization systems on fertilizer agronomic efficiency of *Phyllostachys Praecox* stand

处理编号 Treatment No.	N (fresh shoot kg kg^{-1})	P (fresh shoot kg kg^{-1})	K (fresh shoot kg kg^{-1})
1	—	—	—
2	4.7c	23.6c	12.4c
3	6.6b	45.0a	16.8b
4	7.2b	44.2a	17.3b
5	187.5a	35.6ab	37.5a

注 Note: 同一列平均数后注有不同英文字母者为达到新复极差测验 5%显著水平 Means followed by a different letter within columns are significantly different according to Duncan's new multiple range test, $p \leq 0.05$

3 讨 论

3.1 土壤肥力质量与环境质量

供试的雷竹园实施高效栽培技术已达 10 a 之久，因此试验前的土壤肥力指标就已存在耕层土壤养分富集和土壤酸化的问题。因为试验前雷竹园土壤全氮和速效养分已接近或远高于目前一致公认存在土壤养分富集和土壤酸化问题的蔬菜地，而土壤 pH 则大大低于蔬菜地。浙江省嘉兴地区 10 个高肥水平的蔬菜地土壤肥力的测定结果显示[8]，土壤 pH5.27，全氮 2.23 g kg^{-1}，水解氮 249 mg kg^{-1}，有效磷 115 mg kg^{-1}，速效钾 319 mg kg^{-1}。比较两者的结果可以发现，雷竹园的土壤有效磷较蔬菜地高 1.94 倍，而雷竹园的土壤 pH 较蔬菜地低 1.10 个单位。

本研究的结果显示，施用化肥各处理的土壤 pH 均有不同程度的降低，尤以常规施肥处理为甚。该处理的 0～30cm 土壤 pH 在 10 个月内降低了 0.18 个单位。在本试验的条件下，

土壤的酸化是过量施用化肥[9-10]和酸沉降[11]共同作用的结果。

当土壤 pH 低于 4.5 时，土壤溶液中会产生大量的交换性 Al^{3+}， 它是酸性土壤上作物生长的主要限制因子[12]。雷竹适宜于酸性至中性（pH 4.5～7.0）土壤中生长[1]。目前已有部分雷竹园的土壤 pH 低于 4.5，因此雷竹园因过量施用化肥而引起土壤酸化应当加以控制。

速效养分的动态变化显示，在本研究取样的各个时期，各处理的土壤速效氮磷钾含量均以翌年 3 月取样的最低（表 4 至表 6）。这可能与此时正是雷竹笋芽分化和出笋期有关。因为笋芽分化和出笋需要消耗大量的速效养分。

过量施用化肥所引起的雷竹林土壤肥力质量的退化主要表现在土壤酸化和土壤速效氮磷钾的过量积累[1]。本研究的结果显示，因施肥引起的土壤速效氮磷钾的过量积累和土壤酸化的程度按以下次序递减：常规施肥>专用复合肥≈缓释肥>微生物肥。其原因有二:其一，各处理的施肥量也按此次序递减，专用复合肥和缓释肥处理的N、P、K化肥用量分别较常规施肥处理减少了40%、43.2%～44.6%、17.1%～23.9%，而微生物处理的N、P、K化肥用量分别较常规施肥处理减少了97.7%、29.1%和64.3%；其二，专用复合肥、缓释肥和微生物肥提高了肥料利用率（表8）。

过量施用化肥可导致雷竹林土壤养分的大幅增加，尤其是有效磷超负荷累积[13]。2007年对所采37个雷竹林土壤样本的测定结果显示, 土壤全氮和速效氮分别比1999年增长2.47倍和2.05倍[1]。雷竹林土壤养分的快速和超负荷累积是因为过量施用化肥使雷竹林土壤养分平衡状况出现了极大的盈余。孟赐福等[2]的研究表明，高量化肥处理后氮、磷和钾的盈余量与输出量之比分别为2.7、13.4和6.9，氮、磷和钾盈余量分别达到1 187 kg hm^{-2} a^{-1}、225 kg hm^{-2} a^{-1}和847 kg hm^{-2} a^{-1}。

据报道，当土壤氮素平衡盈余超过20%、磷素超过150%、钾素超过50%，就可能引起对环境的潜在威胁[14]。当土壤BrayⅠ–P在90～140 mg kg^{-1}之间，土壤磷素的流失潜能明显增加[14]。Haygarth等[15]研究则表明，当化肥或有机肥施入土壤而未被固定时，土壤磷库能立即被输出。目前，雷竹林土壤养分盈余远远超过可能引起对环境潜在威胁的盈余量[3]，本试验中，试验结束时常规施肥处理的土壤BrayⅠ–P含量竟高达459 mg kg^{-1}，因此雷竹林中的养分流失可对周边水体产生严重的污染。浙江省临安市雷竹林地25个水样的分析表明[1]，竹产区地表水总氮、氨氮含量均超过GB3838-2002《地表水环境质量标准》Ⅴ类水标准，属劣Ⅴ类水；以总磷作为衡量指标，雷竹林排水沟水属Ⅳ类，而毗邻雷竹林的河水属Ⅱ类；可溶性总碳含量污染严重。

从本试验结果来看，施用缓释肥和微生物肥两个处理有利于减少雷竹林土壤磷素的积

累，从而降低土壤磷向水体流失的风险。

3.2 养分利用率

与常规施肥相比，专用复合肥和缓释肥显著提高了氮、磷和钾农学利用率，其提高的幅度分别为40.4%～53.2%、50.8%～90.7%和35.5%～39.5%，施用微生物肥提高的幅度更大，分别为38.9倍、67.8%和2.0倍。

据报道，热带地区水稻的氮肥农学效率为15～25 kg kg^{-1} [16]，我国水稻氮肥农学效率一般在10～20 kg kg^{-1} [17]。吴萍萍等[7]在红壤稻田进行长期施肥的研究结果显示，氮、磷和钾的农学利用率分别为16.1 kg kg^{-1}、85.4 kg kg^{-1}和19.4 kg kg^{-1}。然而，本研究施肥量最高的常规施肥的肥料农学利用率最低，氮、磷和钾农学利用率分别为鲜笋4.7 kg kg^{-1}、23.6 kg kg^{-1} 和14.2 kg kg^{-1}。如果将鲜笋换算为干笋，其氮、磷和钾的农学利用率分别干笋为0.5 kg kg^{-1} 、2.45 kg kg^{-1} 和1.4 kg kg^{-1}。这表明在本试验条件下，雷竹施肥的农学利用率非常低。

本研究中不施肥处理的鲜竹笋产量达到13500 kg hm^{-2}，高于浙江省雷竹产量的平均单产水平。对于浙江省的主要雷竹产区，肥料利用率低有三方面的原因不可忽视：（1）当季的施肥量大大高于雷竹的最佳施肥量。据研究[1]，每hm^2生产1 t竹笋所吸收的N、P和K分别为 5.0 kg、0.7 kg 和3.0 kg。如按氮、磷、钾肥的利用率分别为 30%、25%、35%计算。每hm^2生产15t竹笋的雷竹林，N、P和K肥的用量分别为225 kg、40 kg 和125 kg。（2）土壤的基础肥力水平很高，土壤氮、磷、钾养分都有极大的盈余。（3）氮磷钾配比不合理。据研究[1]，雷竹最佳的N：P：K为1：0.14：0.6，而目前生产中使用N： P_2O_5：K_2O比例为15：15： 15 的各类复合肥比较常见。

降低化肥用量可提高肥料农学利用率，这与孟赐福等[3]的研究结果是一致的。从本研究和其他研究者的结果[3]分析，浙江省主要雷竹产区，如需提高肥料利用率，减低养分流失风险，减少30％～50％的施肥量是可行和必要的。

本研究中，专用复合肥提高了肥料农学利用率是由于其氮磷钾配比符合雷竹的营养特性，同时加入了雷竹生长所必需的中量元素，缓释肥则是通过肥料释放尽量与作物营养需求相协调来提高肥料利用率[18]。微生物肥主要是通过活化土壤养分来提高肥料利用率[19]。这可从本试验的结果得到佐证。试验结束时，施微生物肥处理的速效氮磷钾含量接近或超过施专用复合肥的处理4，比不施肥的处理1则分别提高了40.3%、29.5%和19.8% (表4至表6)。

3.3 竹笋产量和经济效益

本研究的结果显示，常规施肥的竹笋产量和经济效益分别比不施肥的对照处理提高29.6%和14.3%。与常规施肥处理比较，减少氮磷钾用量17.1%～44.6%的专用复合肥和缓释

肥两个处理仅分别降低了雷竹笋产量0.5%和1.7%，而减少氮磷钾用量29.1%～97.7%的微生物肥处理也只降低了雷竹笋产量1.4%，然而这3个处理的经济效益却分别增加了3.0%、0.5%和0.3%。这充分说明，过量化肥用量对提高竹笋产量和经济效益没有好处。

4 结 论

本研究的结果说明，已存在耕层土壤养分富集和土壤酸化问题的雷竹林中，尤为突出的问题是土壤磷素超量富集和土壤的极度酸化。这将对环境造成极大的威胁，同时严重影响雷竹的生长和产量。因而，在雷竹施肥管理中，继续施用高化肥用量将会进一步加剧这一土壤演变进程。这不仅不会提高竹笋产量和经济效益，同时还可造成养分的大量盈余，从而导致养分的大量流失。综合产量、肥料利用率、经济效益和环境 4 个因素，大幅减少化肥用量，并推广施用缓释肥、竹笋专用肥和微生物肥，不仅维持了竹笋的较高产量和经济效益，显著提高养分利用效率，还可有效防止因肥料过量施用而带来的环境问题，具有经济和环境双重效益，是雷竹合理施肥的发展方向。

参考文献

[1] 姜培坤，徐秋芳，周国模，等.雷竹林土壤质量及其演变趋势. 北京：中国农业出版社,2009: 23-30，134-140，216-224，261-267. Jiang P K, Xu Q F, Zhou G M, et al. Soil Quality under *Phyllostachys praecox* Stands and Its Evolution Trend (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2009: 23-30, 134-140, 216-224,261-267

[2] 孟赐福，沈菁,姜培坤,等.不同施肥处理对雷竹林土壤养分平衡和竹笋产量的影响. 竹子研究汇刊, 2009,28 (4) :11-17. Meng C F, Shen J, Jiang P K, et al. Effects of different fertilization on soil nutrient balance and bamboo shoot yield of *Phyllostachys praecox* stands (In Chinese). Journal of Bamboo Research, 2009, 28 (4) :11—17

[3] 姜培坤，俞益武，金爱武，等. 丰产雷竹林地土壤养分分析. 竹子研究汇刊，2000，19(4)：50—53. Jiang P K, Yu Y W, Jin A W, et al. Analysis on nutrients of soil under high- yield *Phyllostacys praecox f. prevelnalis* forest (In Chinese). Journal of Bamboo Research, 2000，19(4)：50—53

[4] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京：中国农业科技出版社，2000. Lu R K. Analytical methods of soil agricultural chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000

[5] Jagadeeswaran R, Murugappan V, Govindaswamy M. Effect of slow release NPK fertilizer sources on the nutrient use efficiency in turmeric (*Curcuma longa* L.). World Journal of Agricultural Sciences, 2005, 1 (1): 65—69

[6] 霍 竹，付晋锋，王 璞. 秸秆还田和氮肥施用对夏玉米氮肥利用率的影响.土 壤，2005, 37 (2): 202—204. Huo Z, Fu J F, Wang P. Effects of application of N fertilizer and crop

residues as manure on N-fertilizer recovery rate of summer maize (In Chinese).Soils, 2005, 37 (2): 202—204

[7] 吴萍萍，刘金剑，周毅，等. 长期不同施肥制度对红壤稻田肥料利用率的影响. 植物营养与肥料学报, 2008, 14 (2):277—283. Wu P P, Liu J J, Zhou Y, et al. Effects of different long term fertilizing systems on fertilizer use efficiency in red paddy soil (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008,14 (2):277—283

[8] Cao Z H, Huang J F, Zhang C S, et al. Soil Quality Evolution After Land Use Change From Paddy Soil to Vegetable Land. Environmental Geochemistry and Health, 2004,26 (2): 97—103

[9]Barak P，Jobe B O, Krueger A R, et al. Effects of long-term soil acidification due to nitrogen fertilizer inputs in Wisconsin．Plant and Soil，1997, 197 : 61—69

[10] 王小兵, 骆永明, 李振高，等.长期定位施肥对亚热带丘陵地区红壤旱地质量的影响Ⅰ. 酸度. 土壤学报,2011,48(1):98—102. Wang X B, Luo Y M, Li Z G, et al. Effect of long-term stationary fertilization on upland red soil quality in subtropical hilly regions.Ⅰ. Acidity(In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2011，48(1)：98—102

[11] Liu K H, Fang Y T, Yu F M, et al. Soil acidification in response to acid deposition in three subtropical forests of subtropical China. Pedosphere, 2010, 20 (3): 399—408

[12] Meng C F, Lu X N, Cao Z H, et al. Long-term effects of lime application on soil acidity and crop yields on a red soil in central Zhejiang. Soil and Plant, 2004,265:101-109

[13] 姜培坤, 徐秋芳.雷竹早产高效栽培过程中土壤养分质量分数的变化. 浙江林学院学报, 2006, 23(30):242—247. Jiang P K, Xu Q F. Soil nutrients in response to intensive management of *Phyllostachys praecox* (In Chinese).Journal of Zhejiang Forestry College, 2006, 23(30):242—247

[14] 章明奎，周翠，方利平．水稻土磷环境敏感临界值的研究．农业环境科学学报，2006，25(1)：170—174．Zhang M K, Zhou C, Fang L P. Environmentally sensitive thresholds of phosphorus of paddy soils (In Chinese). Journal of Agro-Envieonment Sience, 2006, 25 (1) : 170-174

[15] Haygarth P M, Hepworth L, Jarvis S C. Forms of phosphorus transfer in hydrological pathways from soil under grazed grassland. Eur J Soil Sci, 1998, 49 : 65—72

[16] 刘立军，徐伟，唐成，等. 土壤背景氮供应对水稻产量和氮肥利用率的影响. 中国水稻科学，2005，19 (4)：343—349. Liu L J, Xu W, Tang C, et al. Effect of indigenous nitrogen supply of soil on the grain yield and fertilizer—N use efficiency in rice (In Chinese). Chinese J Rice Sci. 2005，19 (4) : 343—349

[17]冯涛，杨京平，施宏鑫，等. 高肥力稻田不同施氮水平下的氮肥效应和几种氮肥利用率的研究. 浙江大学学报:农业与生命科学版,2006, 32 (1):60—64. Feng T, Yang J P, Shi H X, et al. Effect of N fertilizer and N use efficiency under different N levels of application in high-fertility paddy field (In Chinese). Journal of Zhejiang University: Agri ＆ Life Sci，2006，32(1) : 60—64

[18] 赵先贵,肖玲. 控释肥料的研究进展. 中国生态农业学报, 2002 10 (3) :95—97. Zhao X G, Xiao L. Current research on controlled release fertilizers (In Chinese). Chinese Journal of Eco- Agriculture, 2002, 10 (3) :95—97

[19] 郑兆飞．EM 有机生物肥对毛竹林地土壤性质的影响．竹子研究汇刊，2008，27(2)：38—41．Zhen Z F. The influence of EM organic bio-fertilizer on the soil properties of moso bamboo forests (In Chinese). Journal of Bamboo Research, 2008，27(2) : 38—41

EFFECTS OF DIFFERENT FERTILIZATION ON SOIL FERTILITY QUALITY, FERTILIZER USE EFFICIENCY, AND BAMBOO SHOOT YIELDS OF *PHYLLOSTACHYS PRAECOX* STAND

Chen Wen[1,2] Wu Jiasen[1,2] Jiang Peikun[1,2]† Xu Kaiping[2] Huang Chengpeng[2]

(1 The Nurturing Station for the State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Lin'an, Zhejiang 311300, China）

(2 School of Environmental Science and Natural Resources, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Lin'an, Zhejiang 311300, China）

Abstract A field experiment was conducted on a *Phyllostachys praecox* stand of Lin'an county, Zhejiang Province, China in 2009 to compare the effects of conventional fertilization (CF), controlled-release fertilizer (CRF), special compound fertilizer (SCF)，and microbial fertilizer (MF) on soil fertility quality, fertility use efficiency, and bamboo shoot yields of *Phyllostachys praecox* stand. The results showed the degrees of excessive-accumulation of available N, P, and K in the soil and soil acidification induced by fertilization followed the order of : CF＞SF≈CRF＞MF. The lowest fertilizer agronomic efficiency was obtained from CF and its agronomic efficiencies of N, P, and K were 4.7 , 23.6, and 14.2 kg fresh shoot ·kg^{-1}. As Compared to the CF, application of SCF and CRF increased agronomic efficiencies of N, P, and K by 40.4%～53.2%, 50.8%～90.7%, and 35.5%～39.5%, respectively, whereas application of MF increased agronomic efficiencies of N, P, and K by 38.9、0.68 and 2.0 times, respectively. Compared to the control, CF increased bamboo shoot yields and economic benefit by 29.6% and 14.3%, respectively，where application of SCF, CRF, and WF increased bamboo shoot yields and economic benefit by 27.55%～29.0% and 14.6%～17.8%, respectively.

Key words Fertilization；Bamboo shoot; Soil fertility quality; Fertilizer agronomic efficiency; Yield; Economic benefit